



Capítulo II

Avaliação do ciclo de vida aplicada à conversão da energia

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta de análise dos potenciais impactos de produtos e serviços ao longo do seu ciclo de vida, ou seja, ela adota uma abordagem sistêmica desde a extração dos recursos naturais necessários para a produção dos materiais, fabricação dos componentes até a obsolescência e destinação final dos produtos e serviços avaliados.

A ACV está intimamente relacionada com a história da análise energética, uma vez que na década de 1970 eram comuns análises buscando caracterizar as tecnologias de conversão de energia do

ponto de vista do seu balanço líquido de energia (net energy ratio) ao longo do seu ciclo de vida (Chapman et al. 1974). A abordagem sistêmica que é uma das características da ACV já estava presente nestes estudos.

Atualmente, a ACV é descrita pela norma ABNT ISO 14040 como “compilação e avaliação dos insumos e produtos e dos respectivos impactos ambientais de um sistema de produto ao longo de seu ciclo de vida” (ABNT, 2009). A análise depende da contabilidade de fluxos de materiais e energia ao longo do ciclo de vida (Figura 1).



Figura 1 - Etapas típicas do ciclo de vida de uma unidade de conversão de energia.



Os fluxos de entrada mostrados na Figura 1 (energia e materiais) devem ser quantificados para compor o inventário do ciclo de vida. Além da energia, diretamente consumida em cada etapa, também deve ser quantificada a energia embutida nos materiais, como se cada material também tivesse o seu ciclo de vida inventariado. Os resíduos podem tanto estar na forma de matéria, sendo que a emissão de poluentes, por exemplo, pode ser quantificada em massa de poluente, ou na forma de calor (energia). Na fase de inventário é importante que sejam observados os balanços de massa e de energia.

A quantificação dos fluxos de entrada e saída de energia ao longo do ciclo de vida é uma parte fundamental da etapa de inventário do ciclo de vida. Portanto, os analistas precisam ter familiaridade com a análise energética e a conversão dos diferentes vetores energéticos em energia primária. Lembrando que a emissão de poluentes, como o dióxido de carbono (CO_2) e o dióxido de enxofre (SO_2), está, quase sempre, associada com a queima de combustíveis fósseis. Já a emissão de óxido de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis (COV) depende da razão de mistura entre o ar e o combustível da queima (Nazaroff e Alvarez-Cohen, 2000).

Além de sistêmica, a ACV também apresenta um caráter sistemático, pois a sua realização se dá por meio de uma sequência de etapas. A etapa inicial é a definição do objetivo e do escopo

da avaliação. Nesta etapa, o objetivo é definido tendo em vista a aplicação da avaliação que pode representar o interesse de uma empresa em avaliar o desempenho de seus produtos e comunicá-los aos seus clientes, por exemplo, ou a comparação entre diferentes alternativas para a geração de eletricidade. Esta etapa também está associada com a definição da unidade funcional e com a fronteira do sistema estudado. No caso da comparação entre alternativas de geração, a unidade funcional pode ser a produção de 1 kWh. A unidade funcional é a base para a quantificação dos potenciais impactos que resultam da ACV, por exemplo, “gramas de dióxido de carbono equivalente por kWh ($\text{gCO}_2\text{e/kWh}$)” ou “Mega Joules por kWh (MJ/kWh)”. Já a fronteira do sistema define quais são as etapas consideradas e o escopo se refere, dentre outras coisas, ao tipo de informação que deve ser processada durante a ACV. Considerando as etapas apresentadas na Figura 1, a fronteira do sistema seria do berço (extração de recursos naturais) ao fim de vida (demolição). Mas poderia se estender ao túmulo (disposição final) ou ser interrompida no portão da fábrica (fabricação). Independentemente da fronteira do sistema aplicada, a unidade funcional por kWh pode ser adotada.

A fase seguinte da ACV é o inventário do ciclo de vida. Nesta etapa, o analista deve quantificar os fluxos de entrada e saída apresentados na Figura 1. Se o interesse é determinar as emissões

www.tramontina.com.br

escolha
qualidade,
escolha
Tramontina.

Na hora de fazer sua instalação elétrica aparente, conte com a linha de condutores em alumínio que oferece uma solução completa com a máxima resistência e segurança. **Escolha Tramontina e faça bonito.**

TRAMONTINA

o prazer de fazer bonito



CONDULETES



de CO₂ de uma termelétrica, basta quantificar a energia consumida pela mesma e utilizar um fator de emissão para converter a energia em CO₂. Já para determinar as emissões de NO_x, são necessárias informações mais precisas sobre a termelétrica. A etapa de inventário demanda um grande esforço, pois, dependendo do escopo da ACV, ela demanda informações sobre várias espécies de substâncias lançadas no ambiente. Geralmente, esta etapa é realizada com o apoio de bases de dados de inventário que representam processos típicos. O problema é que a maioria destes dados se refere a processos e informações coletadas em outros países e que foram coletadas alguns anos atrás. Uma forma de solucionar parte desses problemas é reduzir o escopo da ACV, investindo na mensuração direta de menos fluxos. Nesse caso, pode-se medir o consumo de energia e calcular as emissões de CO₂. Pode-se medir o consumo dos principais materiais e determinar a produção de resíduos por meio de um balanço de massa. O mesmo pode ser aplicado ao consumo de água.

A fase seguinte da ACV é a avaliação do impacto do ciclo de vida. Nesta fase, os fluxos são classificados de acordo com diferentes categorias de impacto. As categorias de impacto refletem potenciais impactos ambientais de forma quantitativa e cada uma delas tem uma unidade própria. A categoria de impacto gases do efeito estufa avalia o potencial de impacto na mudança climática global e a unidade típica é em gramas de dióxido de carbono equivalente (gCO₂e). Para calcular este resultado é necessário identificar todos os fluxos de gases de efeito estufa, multiplicar cada gás pelo seu potencial de aquecimento global e somar os resultados. O mesmo tipo de análise é realizado para outras categorias de impacto. Por exemplo, a ecotoxicidade avalia o impacto potencial de substâncias

tóxicas no ambiente e a unidade usada é o 1-4 di-clorobenzeno. A eutrofização avalia o impacto potencial dos nutrientes, principalmente fósforo e nitrogênio, que levam a um crescimento abrupto de algas, reduzindo o oxigênio dissolvido no ambiente. A oxidação fotoquímica avalia o impacto potencial devido à produção de ozônio troposférico que é um poluente com impactos na saúde humana. A unidade nesse caso, kg de NMVOC é a sigla em inglês para quilogramas de compostos orgânicos não metano.

A Figura 2 apresenta resultados de ACV para alguns sistemas de geração de eletricidade considerando algumas categorias de impacto típicas. Nela podemos observar termelétricas a gás natural com ciclo combinado (GNCC) com e sem CCS. O CCS é uma tecnologia ainda pouco aplicada em escala comercial que separa o CO₂ emitido pela chaminé e o injeta em um reservatório geológico. Mas como esta operação consome eletricidade para comprimir o gás, por exemplo, a redução das emissões não é tão relevante quanto à substituição do gás natural pela energia eólica. O Poli-Si (policristalino de silício) representa a tecnologia dominante atualmente no mercado para a fabricação de módulos solares fotovoltaicos. A Figura 2 também apresenta dois resultados para hidrelétricas indicando que o desempenho deste tipo de usina é bastante variável, pois, além dos fluxos associados com o consumo direto de energia e materiais para a construção da usina, existem também fluxos biogênicos que devem ser incluídos na ACV, como por exemplo, as emissões de metano dos reservatórios. Uma usina a fio d'água, na qual o tempo de residência da água no reservatório é inferior a uma semana tende a ter menos emissões de CH₄ por kWh do que uma usina com um grande reservatório no qual o tempo de residência da água é mais longo.

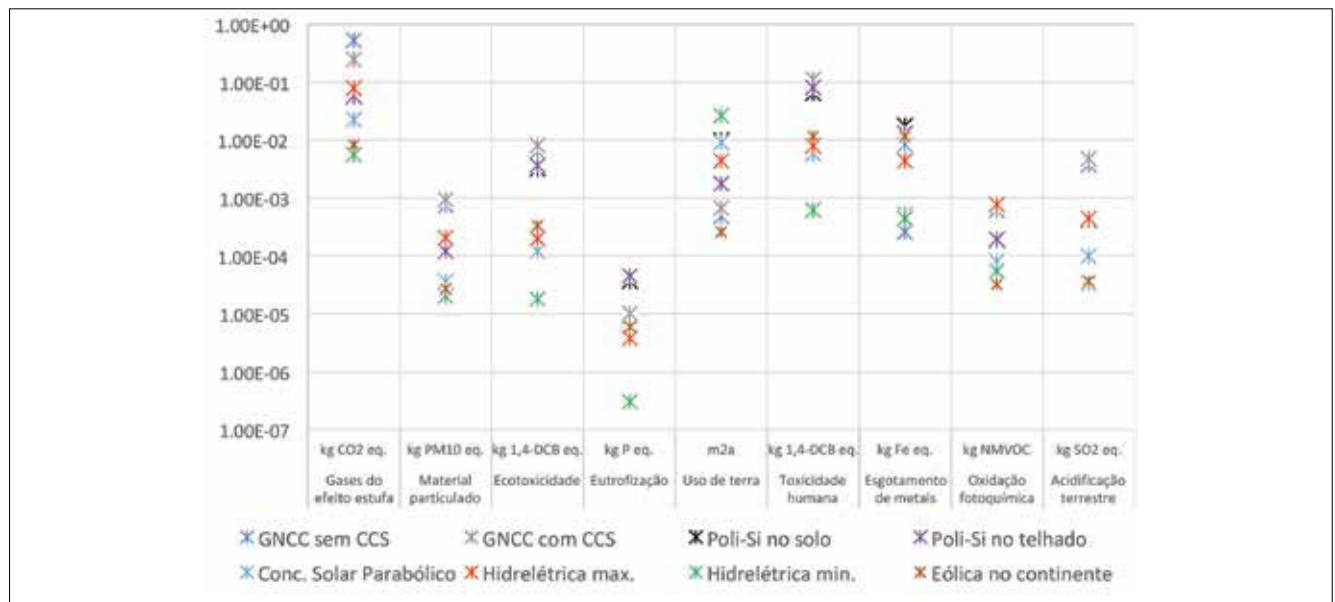


Figura 2 - Resultados de AVC para geração de 1 kWh por meio de diferentes sistemas (Hertwich et al. 2015).

CABOS FOTOVOLTAICOS PRYSMIAN. DESEMPENHO QUE GERA TRANQUILIDADE E SEGURANÇA.

Os produtos e soluções Prysmian para instalações fotovoltaicas são reconhecidos por sua durabilidade e confiabilidade. Nossos cabos são projetados com máximo rigor, de acordo com várias classificações e requisitos, proporcionando segurança, livre movimentação e resistência térmica, mesmo nos ambientes mais severos.

É a líder mundial em fios e cabos trabalhando de sol a sol pelo melhor desempenho da sua instalação.



Saiba mais sobre
as soluções Prysmian
em cabos para
energia renovável.
prysmiangroup.com.br

Prysmian
Group

Linking
the Future



Uma aplicação bastante interessante da ACV é para avaliar medidas para a mitigação da mudança climática global. Isso porque as emissões de CO₂ e outros gases do efeito estufa ocorrem em diferentes locais ao longo do ciclo de vida. Porém, como se trata de um problema de escala global, independentemente de onde ocorrem as emissões, o seu efeito é o mesmo: aquecimento global, elevação do nível do mar, alteração na precipitação. Quando reduzimos o escopo da ACV para inventariar os fluxos dos gases de efeito estufa e avaliar o seu impacto em termos de massa de CO₂e, estamos determinando a Pegada de Carbono de produtos e serviços. Este tipo de abordagem tem sido adotada pelos relatórios do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas e da Agência Internacional de Energia.

Atualmente, existe uma busca por formas alternativas de transporte em veículos leves. A Pegada de Carbono tem sido utilizada para comparar o desempenho ambiental de diferentes alternativas, principalmente, os veículos elétricos e veículos híbridos, que têm conquistado fatias crescentes nas vendas de veículos novos. A Figura 3 compara as seguintes alternativas:

- veículo elétrico (VE) com uma bateria de 40 kWh (VEB 40);
- veículo elétrico (VE) com uma bateria de 80 kWh (VEB 80);
- veículo com motor a combustão interna (MCI);
- veículo elétrico híbrido (VEH);
- veículo elétrico plug-in híbrido (VEPH), que além do motor a combustão e o elétrico tem uma bateria com menos capacidade que o VE;
- veículo com célula a combustível (VCC).

A Figura 3 mostra que, apesar de não emitir durante a fase de uso, os VE são responsáveis por emissões de gases de efeito estufa durante o ciclo do combustível do poço ao tanque. Trata-se das emissões da geração de eletricidade. Uma forma de reduzir estas

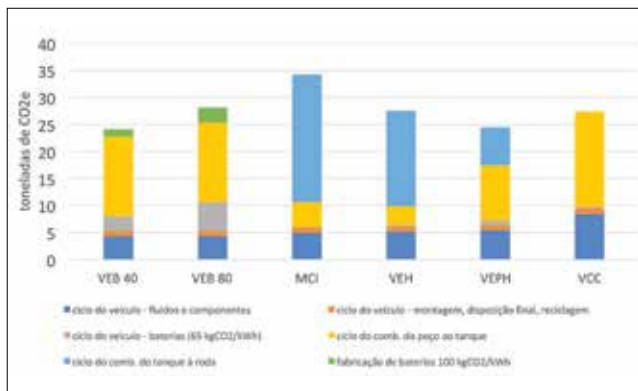


Figura 3 - Emissões de gases do efeito estufa de várias tecnologias de automóvel médio ao longo de 10 anos de uso (IEA 2020).

emissões é por meio da escolha de energia hidrelétrica, eólica ou solar para gerar eletricidade. Lembrando que, de acordo com a Figura 1, nenhuma forma de conversão de energia em eletricidade é livre de emissão de gases do efeito estufa. Já os veículos com motor de combustão interna apresentam grande parte das emissões no ciclo do combustível do tanque à roda, ou seja, devido à combustão da gasolina ou do diesel, durante a fase de uso do veículo. Uma forma de reduzir estas emissões é por meio da escolha de biocombustíveis, sendo que esta alternativa é uma das que mais reduz a pegada de carbono do transporte em veículos leves.

Como vimos nesse relato sintético, a ACV é uma ferramenta de análise que tem sido utilizada na avaliação do desempenho de tecnologias de conversão de energia buscando caracterizar toda a cadeia de serviços energéticos. Esta visão sistêmica está no amago da ACV e, mesmo que seja aplicada a partir de formas mais simplificadas de inventário, pode indicar os gargalos para a melhoria do desempenho ambiental das cadeias responsáveis pelos serviços energéticos imprescindíveis a nossa sociedade contemporânea.

REFERÊNCIAS

- ABNT, 2009. ISO 14040:2006 Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 21/05/2009
- Chapman, P.F., G. Leach, e M. Slessor. 1974. "2. The Energy Cost of Fuels". *Energy Policy* 2 (3): 231-43. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(74\)90048-2](https://doi.org/10.1016/0301-4215(74)90048-2).
- Hertwich, Edgar G., Thomas Gibon, Evert A. Bouman, Anders Arvesen, Sangwon Suh, Garvin A. Heath, Joseph D. Bergesen, Andrea Ramirez, Mabel I. Vega, e Lei Shi. 2015. "Integrated Life-Cycle Assessment of Electricity-Supply Scenarios Confirms Global Environmental Benefit of Low-Carbon Technologies". *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112 (20): 6277-82. <https://doi.org/10.1073/pnas.1312753111>.
- International Energy Agency (IEA) Global EV Outlook 2020. 2020 [doi:https://doi.org/10.1787/d394399e-em](https://doi.org/10.1787/d394399e-em) U <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/d394399e-en>
- Nazaroff, W.W. e Alvarez-Cohen, L (2000) *Environmental Engineering Science*. Wiley; 1ª edição. 720 p.

*Sergio Pacca é professor associado da Universidade de São Paulo (USP) atuando nos cursos de pós-graduação em Sustentabilidade (PPGS-USP) e Energia (PPGE-USP). É Doutor em Energy and Resources pela University of California, Berkeley (2003), pesquisador das áreas de energia, sustentabilidade, mudança climática global, avaliação do ciclo de vida (ACV) e ecologia industrial.